

МИКРОСТРУКТУРА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ  
СИСТЕМЫ Cu–Mo–SС.Ю. Жарков<sup>1</sup>, М.П. Калашников<sup>1</sup>, А.Р. Сунгатулин<sup>1</sup>Научный руководитель: профессор, д.т.н. В.П. Сергеев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4, 634021

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, 634050

E-mail: [retc@ispms.tsc.ru](mailto:retc@ispms.tsc.ru)

## MICROSTRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF Cu–Mo–S COATINGS

S.Yu. Zharkov<sup>1</sup>, M.P. Kalashnikov<sup>1</sup>, A.R. Sungatulin<sup>1</sup>Supervisor: Prof. Dr. V.P. Sergeev<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,

Russia, Tomsk, av. Akademicheskii, 2/4, 634021

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [retc@ispms.tsc.ru](mailto:retc@ispms.tsc.ru)

**Annotation.** The change of wear resistance of a copper friction pair with pulse magnetron Cu–Mo–S tribological coatings was studied by tribological tests in argon and air environment. Microstructure of the coatings was investigated by transmission and scanning electron microscopy. Fiber-globular structure of the coatings was evaluated. Cu–Mo–S coatings can increase the wear resistance of a copper friction pair in ~ 71.7 and ~ 7.9 times in argon and air atmosphere, respectively. Friction coefficient near 0.27 has been observed during tribological tests in air environment.

Эксплуатация в открытом космосе спутниковых антенн, которые в условиях непрерывного вращения принимают слабые электромагнитные сигналы, требует создания электроконтактных пар трения (ЭКПТ) на основе серебряных и медных сплавов, имеющих высокую электропроводность, низкий коэффициент трения и высокую износостойкость в отсутствии смазки [1]. Актуальной задачей является поиск методов повышения срока эксплуатации ЭКПТ для перспективных космических аппаратов. Твердосмазочные покрытия на основе дихалькогенидов широко используются в качестве антифрикционных систем в различных отраслях [2]. Этому способствует низкий коэффициент трения (аномально низкий в условиях вакуума), достаточно высокая термическая стабильность и хорошая воспроизводимость. Однако, использование покрытий из чистого дисульфида молибдена в качестве смазки ЭКПТ проблематично из-за его относительно низкой электропроводности. Одним из возможных путей решения этой задачи представляется осаждение композитных покрытий на основе системы Cu–Mo–S, обладающих низким коэффициентом трения и высокой электропроводностью. Данная работа посвящена изучению триботехнических свойств и микроструктуры покрытий на основе Cu–Mo–S, полученных методом импульсного магнетронного распыления.

В качестве экспериментальных образцов использовались параллелепипеды из меди марки М1. Контртела в виде дисков изготавливались из того же материала. Рабочая сторона их шлифовалась и полировалась до величины шероховатости не хуже  $R_a = 0,63$  мкм. Покрытия на основе системы Cu–Mo–S осаждались в вакуумной установке УВН-05МД «Квант» при давлении аргона 0,3 Па с помощью магнетрона с композиционной мишенью специальной конструкции. Питание магнетрона осуществлялось от импульсного биполярного источника с частотой 50 кГц. Толщина покрытий достигала ~20 мкм.

Образцы испытывались на износ в оригинальной машине в атмосфере аргона по схеме «колодка–диск». Испытания продолжались до тех пор, пока покрытие не разрушалось, и не начинали появляться медные частицы износа подложки. Износостойкость покрытия рассчитывалась как отношение времени износа к убыли массы покрытия. Коэффициент трения покрытия замерялся на машине трения и износа 2070 СМТ-1 на воздухе по схеме «колодка–диск». Структурно-фазовое состояние образцов исследовалось методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100 и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO EVO 50XVP, оба микроскопа оснащены спектрометрами INCAx-акта. С помощью этих спектрометров методами микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) изучался элементный состав покрытий.

Исследование морфологии поверхности осажденных покрытий на основе системы Cu–Mo–S методом РЭМ показали, что покрытия имеют сложно-переплетенную волокнистую структуру, у которой в промежутках между волокнами расположены глобулярные выделения материала (рис.1).

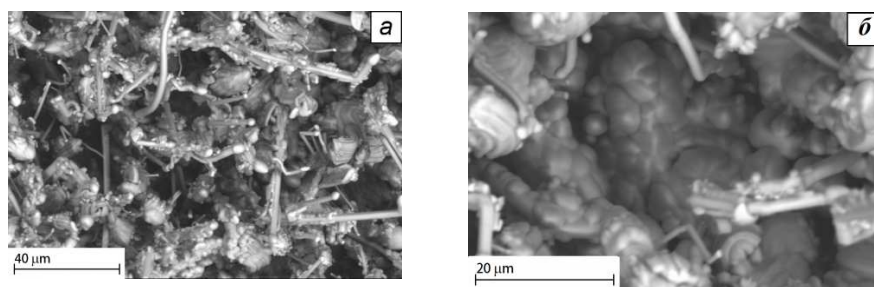


Рис.1. РЭМ-изображения композитного покрытия системы Cu–Mo–S, а)-изображение волокон, б)-изображения глобул между волокнами

Исследование методом ПЭМ поперечного сечения покрытий показало, что обнаруженные глобулы состоят из смеси кристаллитов почти чистой меди в форме, близкой к кубоидам (рис.2а), со средним поперечным размером ~60 нм и небольшого числа сульфидных наночастиц  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$  (рис. 2б) со средним размером ~8 нм. Наблюдаемые методом ПЭМ волокна имеют нанокристаллическую структуру и состоят из тех же сульфидных нанозерен, которые присутствуют в виде включений в глобулах. Химический состав волокон композитного покрытия Cu–Mo–S, определенный методом МРСА с помощью ПЭМ, включает 52 ат.% (Cu) + 19 ат.% (Mo) + 29 ат.% (S), тогда как химический состав глобул – 99,1 ат.% (Cu) + 0,17 ат.% (Mo) + 0,73 ат.% (S).

Время износа медных образцов с покрытием на основе системы Cu–Mo–S в среде аргона в паре с медным контртелом составило 115 часов. При этом убыль массы составила 5,5 мг, так что износостойкость системы увеличилась в ~ 71,7 раз по сравнению с аналогичными испытаниями образцов

без покрытия. В качестве механизмов такого повышения износостойкости из обсуждаемых в литературе может быть предложен следующий. В источниках [2,4] сообщается, что при испытании на трение и износ твердосмазочных покрытий на контртело от этих покрытий может переноситься тонкая слоистая пленка со слабым сопротивлением на сдвиг между слоями. Такая пленка была нами обнаружена методом РЭМ на рабочей поверхности контртела. Испытания в данной работе проходили в условиях замкнутого контура трения, так что пленка могла многократно переноситься с образца на контртело, тем самым облегчая процесс трения скольжения.

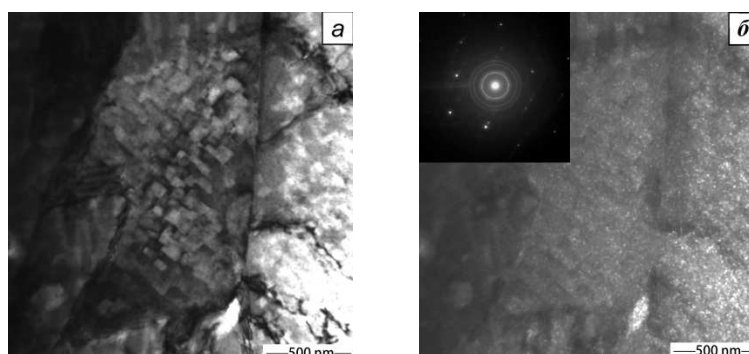


Рис.2. ПЭМ-изображения глобул композитного покрытия на основе системы  $\text{Cu-Mo-S}$ : а - светлопольное изображение, б - темнопольное изображение с микродифракционной картиной

Средний коэффициент трения на воздухе при испытании на машине 2070 СМТ-1 составил 0,27. В работах [2-4] сообщается, что в атмосфере вакуума или инертного газа коэффициент трения покрытия на основе  $\text{MoS}_2$  на порядок ниже, чем при работе в атмосфере влажного воздуха. И действительно, мы наблюдаем при испытаниях на воздухе более низкий эффект повышения износостойкости пары трения «образец с покрытием – контртело» – в  $\sim 7,9$  раз.

Таким образом, установлено, что при импульсном магнетронном осаждении композитных покрытий на основе системы  $\text{Cu-Mo-S}$  формируется сложная волокнисто-глобулярная структура, состоящая из медных кубоидов и сульфидных наночастиц. Испытания на износ показали многократное повышение износостойкости в результате образования смазывающей пленки на рабочих поверхностях образца и контртела.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух В.Я., Гамыгин К.А., Глушкин Я.А. и др. Ферромагнитные электроконтактные материалы для многоканальных вращающихся контактных устройств//Электрические контакты. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2002.-С.148-150.
2. Baker C.C., Chromik R.R., Wahl K.J., Hu J.J., Voevodin A.A. Preparation of chameleon coatings for space and ambient environments//Thin Solid Films – 2007. – V. 515. – P. 6737–6743.
3. Chen Shu-xian, Feng Yi, Li Shu, Xie Yu-juan. Indluence of  $\text{MoS}_2$  contents on sintering process and properties of  $\text{Cu-MoS}_2$  composite //Journal of Materials Science and Engineering – 2008. – V. 2.– №12.
4. Chromik R.R., Baker C.C., Voevodin A.A., Wahl K.J. In situ tribometry of solid lubricant nanocomposite coatings // Wear – 2007. – V. 262. – P.1239–1252.